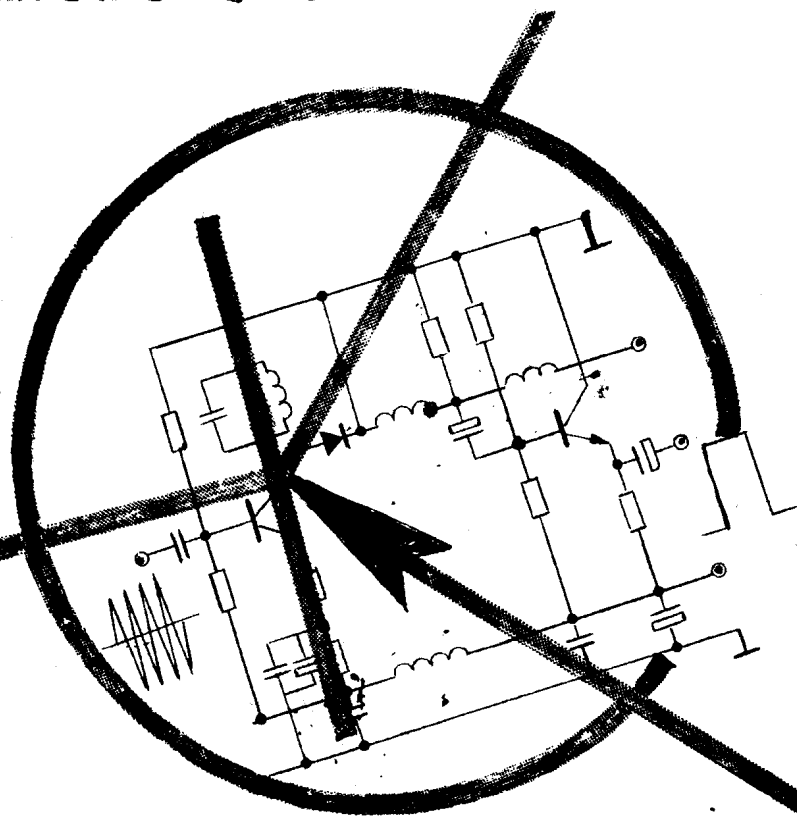


# 晶体管线路



上海市仪表局  
上海科技大学



工人电子训练班

## 毛主席语录

工人阶级必须领导一切。

大学还是要办的，我这里主要说的是理工科大学还要办，但学制要缩短，教育要革命，要无产阶级政治挂帅，走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路。要从有实践经验的工人农民中间选拔学生，到学校学几年以后，又回到生产实践中去。

要狠抓一下雷达、光学仪器、指挥仪，要减轻重量，提高质量，增加数量。

备战、备荒、为人民。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

教育必须为无产阶级政治服务，必须与生产劳动相结合。

## 第八章 射频放大、视频放大、调制及解调

### ( 雷达收发机 ( 上 ) )

#### 目 录

8 - 1	雷达发射机与接收机概述	
§8-1-1	雷达的种类及用途	1 - 2
§8-1-2	雷达工作原理	1 - 3
§8-1-3	对雷达发射机的要求	1 - 8
§8-1-4	对雷达接收机的要求	1-14
8 - 2	晶体管的高频参量及高频等效电路	
§8-2-1	晶体管高频等效电路	2 - 2
§8-2-2	晶体管频率特性参数	2-10
§8-2-3	晶体管噪声系数	2-16
8 - 3	中频放大器	
§8-3-1	概 述	3 - 1
§8-3-2	单调谐中频放大器	3 - 9
一	通频带与选择性	3-10
二	电压增益和功率增益	3-16
三	放大器的稳定性和中和电路	3-22
四	多级放大	3-26
五	单调谐中频放大器设计	3-27
§8-3-3	双调谐中频放大器	3-38
§8-3-4	参差调谐中频放大器	3-47
一	双参差调谐中频放大器	3-47
二	三参差调谐中频放大器	3-50
§8-3-5	对数中放与自动增益控制与对数中放电路	3-56
§8-3-6	共发——共基中频放大器	3-69
§8-3-7	雷达中频放大器	3-73

8 - 4	检波器	
§8-4-1	概 述	4 - 1
§8-4-2	二极管检波原理	4 - 3
§8-4-3	检波器元件的选择原则	4 - 5
§8-4-4	双端式二极管检波器	4-12
8 - 5	视频放大器	
	引 言	5 - 1
§8-5-1	视频放大器的基本电路分析	
	(→) 关于高频(脉冲前沿)补偿问题的讨论	5 - 1
	(1) 电感补偿	5 - 5
	(2) 复合负反馈补偿	5-10
	(→) 关于低频(脉冲顶部)的讨论	5-14
	(⇒) 关于温度补偿问题的讨论	5-17
§8-5-2	雷达站中的视频放大器	
	(→) 概 述	5-21
	(→) 设计指标	5-21
	(⇒) 电路介绍	5-21
§8-5-3	晶体管对数视频放大器	
	(→) 引 言	5-31
	(→) 对数放大器的基本质量指标	5-32
	(⇒) 改变放大倍数实现对数放大的几种方法	5-33

## 8 - 5 视频放大器

### 引言

晶体管视频放大器被用来放大视频信号和脉冲信号的。由于这种信号的频谱很宽，所以这种放大器又称为宽频带放大器，通常其通带在几十赫到几十兆赫之谱。它在电视、雷达、导航、遥测遥控、脉冲多路通讯和核物理学等科学技术中有极其广泛的应用。在晶体管视频放大器中其主要矛盾有增益频宽的矛盾，增益、频宽的稳定性与温度的矛盾及增益与噪声的矛盾。介决这些矛盾的办法除器件本身的改革外，在电路中可采取适当的补偿措施加以解决，本节主要以增益与频宽矛盾及其解决办法作为主要研究对象，介绍一些补偿电路及设计原则，并给达根据这些设计原则而试成的一些具体实用线路，介绍雷达中的视频放大器，电视接收机的末级视频放大器。

### § 8-5-1 视频放大器的基本电路分析

#### (一) 关于高频（脉冲前沿）补偿问题的讨论：

毛主席教导我们说：“大家明白，不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”

我们以前学了低频放大器，读者会提出为什么低频放大器不能用来放大脉冲信号呢？要回答这个问题我们首先要分析一下脉冲波的特点：脉冲波有两个明显的特点，一是具有陡峭的脉冲前后（相当一个频率很高的成份）。一是具有几乎不变的脉冲顶部（相当一个很低的频率成份）。一般低频放大器是用来放大音频信号的，而音频信号一般在几十周到二十千周范围内，而脉冲波的频谱要延伸到几个兆周到几十兆周，因而低频放大器只能放大脉冲频谱中的低频分量。而高频分量就被削减。这样就会导致信号的失真。举一个例子来说明一下。

若输入信号  $u_1$  是三个频率成分组成（基波  $f_0$ ，二次谐波  $2f_0$ ，三次谐波  $3f_0$ ）而假若放大器频带不够宽，至  $3f_0$  时已不能放大，这

样放大器的输出信号  $u_2$  中就只包含二个频率成份 ( $f_0, 2f_0$ )。从图 8-5-1 上可以明显地看到输出信号  $u_2$  由于缺了一个  $3f_0$  的成份因而它的上升部分就比  $u_1$  的上升部分来得缓慢一些。同理可以推知, 若输入一脉冲信号  $u_1$  那么这个放大器输出的脉冲信号  $u_2$  前沿就要比输入脉冲前沿来得长一些, 如图 8-5-2 所示, 这就表示放大器频带狭窄, 被放大的脉冲信号就会产生失真。这种信号的失真就会导致雷达测距不准以及导致电视图像模糊 (图 8-5-2)。因而要放大脉冲信号就要求放大器的频带宽度能在几兆周至几十兆周, 也就是说这个放大器要是一个宽频带放大器。脉冲波的前沿越陡, 则要求放大器的频带越宽。

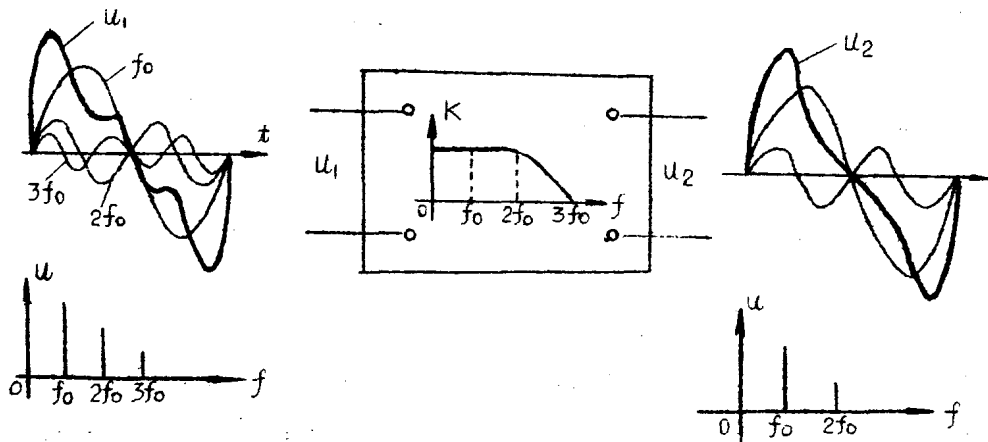


图 8-5-1

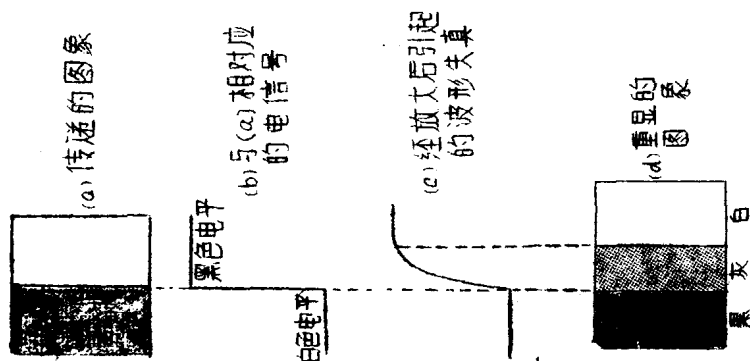


图 8-5-2

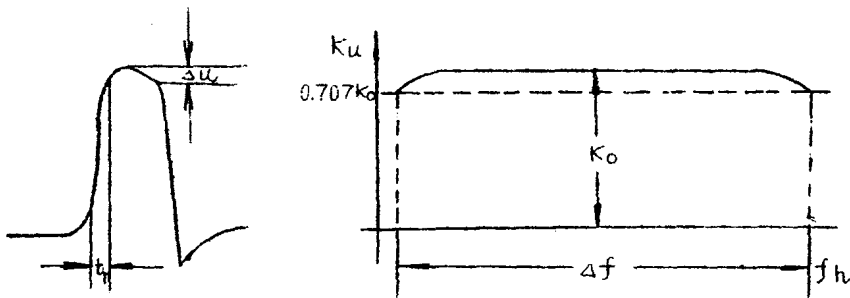


图 8-5-3 脉冲参数与放大器频宽的关系

可以算出放大器的频宽  $\Delta f$  与脉冲前沿  $t_r$  的关系为：

$$\Delta f \doteq f_h = \frac{0.35-0.45}{t_r} \dots\dots\dots (5-1)$$

例如，要放大的脉冲的  $t_r = 0.1 \mu s$   
则要求

$$\Delta f = \frac{0.35 \sim 0.45}{0.1 \times 10^{-6}} = 3.5 \sim 4.5 MC$$

接下去让我们来讨论放大器在高频端放大倍数下降的原因。

对晶体管放大器来说，影响频宽的主要原因有二：

(1) 晶体管的放大系数  $\alpha$  值并非是常数，而随着频率的升高而下降的，下降的原因是因为载流子以扩散运动渡越基区时需要一定的时间，这就造成  $i_c$  滞后于  $i_e$ ；同时因频率升高也使一部分载流子来不及在信号的半周内到达集电结，结果，载流子在基区中停留较长时间，增加复合损失，使  $\alpha$  值降低， $\alpha$  与频率关系的表达式如下：

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}} \dots\dots\dots (8-5-2)$$

式中 $\alpha_0$  通常指1KC时的 $\alpha$ 值， $f_\alpha$  称为晶体管的截止频率。上述 $\alpha(\omega)$ 式绘出的曲线如图8-5-4所示 $\beta$ 与频率的关系式可以推得：

$$\beta(\omega) = \frac{\alpha(\omega)}{1 - \alpha(\omega)} = \frac{\frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}}{1 - \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}} = \frac{\frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}}{1 + j \frac{f}{f_\alpha(1 - \alpha_0)}}$$

或

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

式中

$$f_\beta = f_\alpha(1 - \alpha_0) \qquad \beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

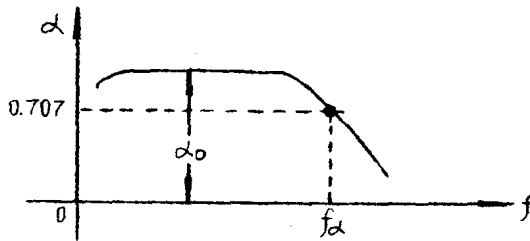


图 8-5-4

(2) 由于线路中存在一定的布线电容和负载电容，而致使高频增益降低。

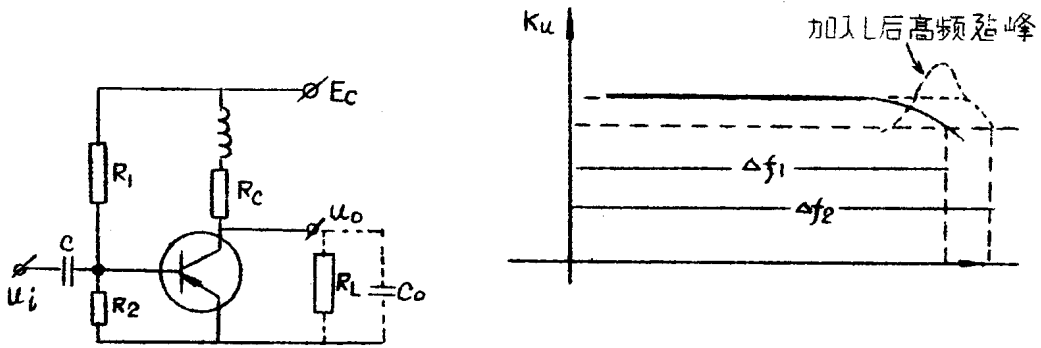
根据影响频宽 $\Delta f$ 的因素，除合适地选择晶体管（通常要选择 $f_\alpha > (10-30)\Delta f$ 的晶体管）频带补偿的主要着眼点在于如何提高



高频增益或压低低频增益的问题上，前者采用与频率有关的负载，而后者则采用与频率有关的负反馈的办法。此将这两种方法分述如下：

(1) 电感补偿：

在集电极负载  $R_C$  中串联电感  $L$  (图 8-5-5) 这样使其总负载随频率增高而变大，从而增加了高频段的增益，使频宽得到了补偿。加入电感  $L$  后能加宽频带也可以从  $L$  与  $C_o$  产生谐振而使高频端“建峰”从而补偿高频率的“跌落”来理解。见图 8-5-5(b)



(a) 并联电感补偿

(b) 加入  $L$  拓宽频带示意图

图 8-5-5

电感  $L$  的数值可由下式来估计：

$$L > \frac{S_o r_b}{2\pi f_a} \dots\dots\dots (8-5-3)$$

其中

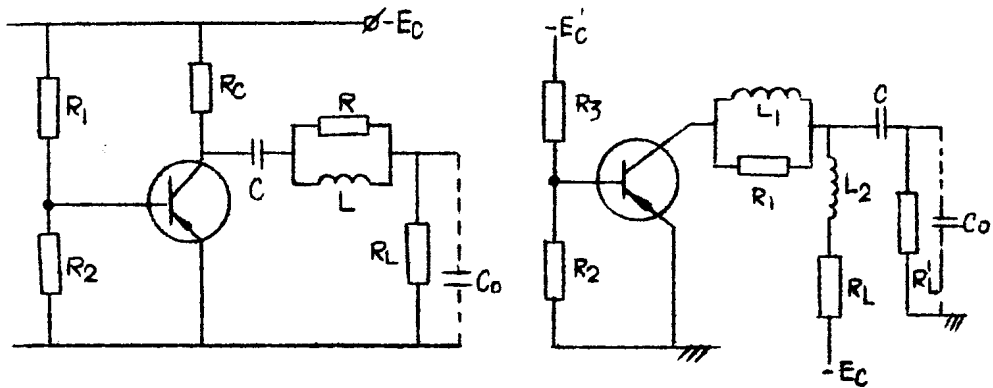
$$S_o = \frac{h_{21e}}{h_{11e}}$$

应该指出，这个  $L$  的数值的确切数值应根据试验确定。若  $R_L$  与  $R_C$  相比拟或比  $R_C$  更小时，这种补偿作用是很小的，因此电感补偿法用在晶体管放大器中就不如用在电子管线路中这样有效。

电感补偿常在下列情况采用：①后一级采用射极输出器时，因射

极输出器的输入阻抗较高，因而采用电感补偿就较有效；②末级视放因与显像管相连，因而采用电感补偿。

除了可以用上述并联电感补偿外，还可以采用串联电感补偿和混合补偿的方法（见图 8-5-6）。

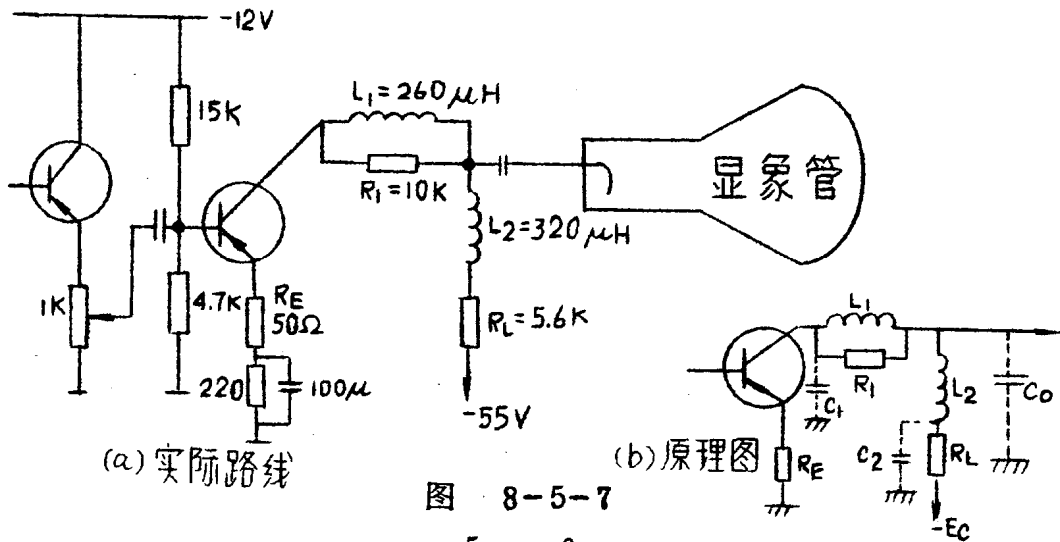


(a) 串联补偿电路

(b) 混合补偿电路

图 8-5-6

混合补偿由于两个电感  $L$ ， $L'$  两次“建峰”，因而可进一步拓宽频带。低如电视机的末级就是应用混合补偿的电路（图 8-5-7）。



(a) 实际路线

(b) 原理图

图 8-5-7

$L_1$  和  $L_2$  在不同的频率上提升高频，从而满足带宽的要求。必须指出这种电路加入显像管后，由于显像管的分布电容  $C_0$  的存在，会使频率特性劣化，因此在设计时应使放大器的带宽略宽于所需带宽；这在选择反馈电阻  $R_E$  和负载电阻  $R_L$  时应加以考虑。

混合补偿电路的元件选择：

负载电阻

$$R_L = \frac{1}{\pi \Delta f C_0} \dots\dots\dots (8-5-4)$$

$\Delta f$ , 所需带宽

$C_0$ , 显像管的分布电容。

设输出电压为  $V_0$ ，则要求晶体管集电极的直流电流。

$$I_C > \frac{V_0}{2R_L} \dots\dots\dots (8-5-5)$$

集电极电源电压

$$V_{CC} > V_0 + V_{Cmin} + V_E \dots\dots\dots (8-5-6)$$

式中： $V_{Cmin}$  集电极最低电压（一般为 1 ~ 2 V）

$V_E$  发射极直流电压（1 V 以上）

由此可以得出集电极损耗：

$$P_C = I_C \left( V_{CC} - \frac{V_0}{2} - V_E \right) \dots\dots\dots (8-5-7)$$

从其等效电路可以推出反馈电阻  $R_E$ 。

$$R_E = \frac{f_c}{f_T} (r'_{bb} + R_g) (1 + 2\pi f_T C_c R_L) - 1/g_m \quad (8-5-8)$$

式中： $f_c$  是截止频率要求  $f_c > \Delta f$

$f_T$  晶体管特性频率

$r_{bb}$  基极电阻

$R_g$  前级发射极输出器的信号源内阻

$C_c$  集电极电容

$g_m$  互导： $1/g_m = 26/I_c$  ( $I_c$  以毫安计)

电压增益：

$$K_u = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_E} \dots\dots\dots (8-5-9)$$

峰化电感：

$$L_1 = \left( \frac{1}{2} + \frac{C_1}{C_0} \right) L_0 \dots\dots\dots (8-5-10)$$

$$L_2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{C_2}{C_0} \right) L_0 \dots\dots\dots (8-5-11)$$

式中：

$$L_0 = \frac{R_L}{\pi \Delta f} \dots\dots\dots (8-5-12)$$

作为例子：举一晶体管电视机用显像管的视频输出电路为例。

如要求输出电压  $V_0 = 50V$  (峰-峰)

$\Delta f = 3.5mc$

$C_1 = 1pf$

$C_0 = 16pf$

$C_2 = 2pf$

则据 (8-5-4)

$$R_L = \frac{1}{\pi \times 3.5 \times 10^6 \times 16 \times 10^{-12}} = 5.6 K\Omega$$

则据 (8-5-5)

$$I_c \geq \frac{50}{2 \times 5.6 \times 10^3} = 4.46 \text{ ma} \quad (\text{取 } 4.5 \text{ ma})$$

(8-5-6)

$$V_{cc} \geq 50 + 1.5 + 1 = 52.5 \text{ V} \quad (\text{取 } 55 \text{ V})$$

(8-5-7)

$$P_c = (55 - \frac{50}{2} - 1) \times 4.5 = 130 \text{ mw}$$

若选用的晶体管:

$$r_{bb} = 50 \Omega \quad C_c = 1.7 \text{ pf}$$

$$f_T = 50 \text{ mc} \quad \text{令 } f_c (> \Delta f) = 4 \text{ mc}$$

若发射极输出器的输出电阻 (发射极电阻用 1K 时)

$$R_g = 125 \Omega$$

则据 (8-5-8)

$$R_E = \frac{4}{50} (50 + 125) (1 + 2\pi \times 5 \times 10^3 \times 1.7 \times 10^{-12} \times 5.6 \times 10^3)$$
$$= \frac{1}{0.038 \times 4.5} \approx 50 \Omega \quad \dots\dots\dots (8-5-9)$$

$$K_V = \frac{0.038 \times 4.5 \times 5.6 \times 10^3}{1 + 0.038 \times 4.5 \times 50} \approx 100 (40 \text{ 分贝})$$

(8-5-12)

$$L_0 = \frac{5.6 \times 10^3}{\pi \times 3.5 \times 10^6} = 510 \mu\text{H}$$

(8-5-10)

$$L_1 = (1/2 + 1/16) 510 \mu\text{H} \approx 260 \mu\text{H}$$

(8-5-11)

$$L_2 = (1/2 + 2/16) 510 \mu\text{H} \approx 320 \mu\text{H}$$

## (2) 复合负反馈补偿

在发射极中加接电阻  $R_e$  和  $C_e$  (图 8-5-8), 这样由于电路中引入了电流负反馈, 因而放大器的输入阻抗显著增高, 其中由于输入电容的降低, 使得前一级放大器的频率特性获得了改善。负反馈的存在, 确实会使得该级放大器的增益降低, 但是输入阻抗的增高, 大大地减弱了该级对前一级负载的旁路作用, 从而使前一级放大器的增益得以提高, 电容  $C_e$  的作用, 在物理意义上不妨可以这样理解, 由于  $C_e$  的存在, 削弱了高频时的负反馈量。因此总的来说, 引入了交流负反馈后放大器的增益频宽都获得了较好的改善。并且增进了电路工作的稳定性。

这个电路的反馈电阻  $R_e$  的选取可按下式计算:

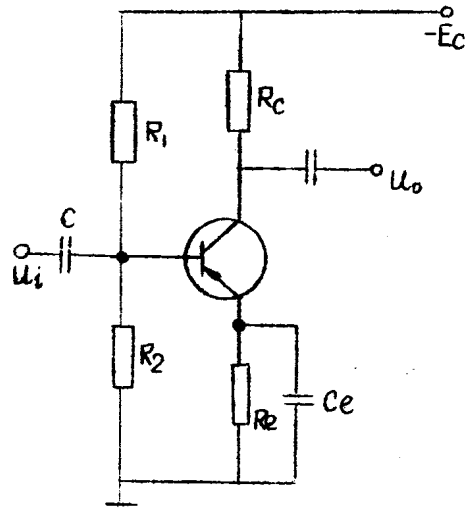


图 8-5-8 加入复合负反馈增宽频带

$$R_e \geq \frac{h_{11e}}{h_{21e}} \left( \frac{R_{in}}{r_e} - 1 \right) \dots\dots\dots (8-5-13)$$

加入  $R_e$  后放大器的增益减小，宽带加宽，如图 8-5-9 所示。但不能全依靠增大  $R_e$  来拓宽频带因  $R_e$  过大，放大器增益下降过多。因

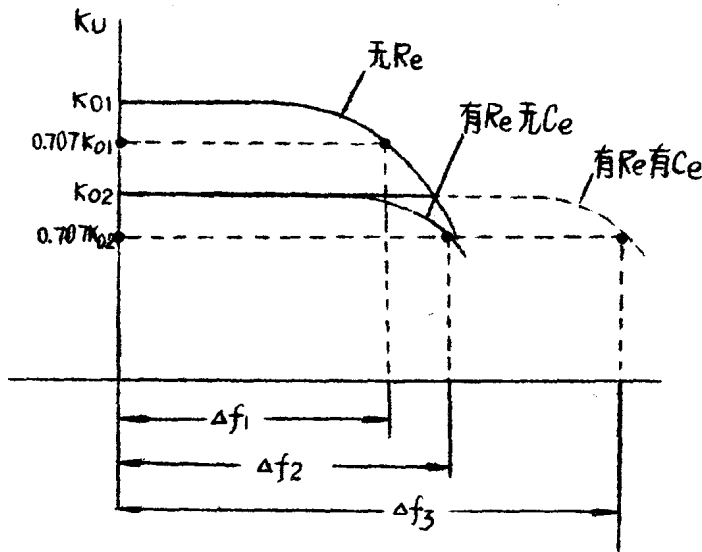


图 8-5-9  $C_e$  和  $R_e$  的作用

而在频带拓宽到一定数值后，就需依靠加入小电容  $C_e$  (通常这个数值在几十至几百微微法) 来改善频率特性 (如图 8-5-9)，电容  $C_e$  的选择对一般应用的高频管可按式作近似计算：

$$C_e \approx \frac{0.6 \sim 0.9}{2\pi R_e f_h} \dots\dots\dots (8-5-14)$$

$f_h$  是频率特性的上限频率，可以近似认为  $f_h \approx \Delta f$

例： $R_e = 120 \Omega$                        $f_h = 7.5 \text{ MC}$

则据 (8-5-14)

$$C_e \approx \frac{0.6 \sim 0.9}{2\pi \times 120 \times 7.5 \times 10^{-6}} = 100 \sim 150 \text{ pf}$$

$C_e$  的选定还需由实验中最终选定，上述近似计算公式，不过给出一个数量范围而已。

其次利用并联反馈  $L_F \cdot R_F$  (图 8-5-10) 也可用来提高频宽， $L_F$  对高频有较大的阻抗，从而降低了高频时的负反馈量而提高了这时的增益。 $R_F$  的大小与增益有关。

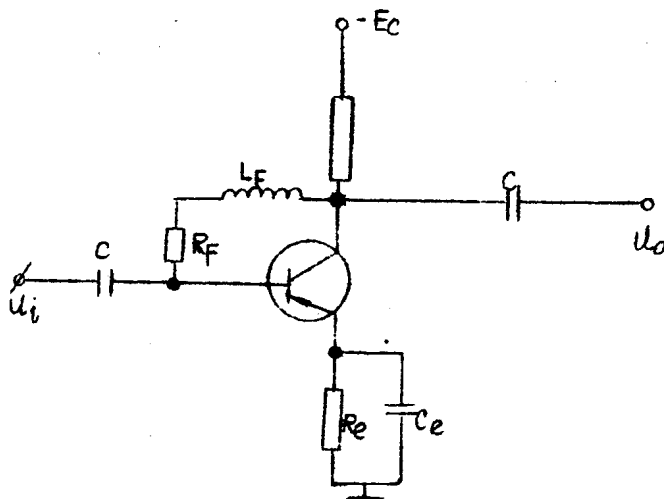


图 8-5-10

这个电路的缺点主要在于输入阻抗较小。

利用图 8-5-11 所示的电路可以有效地提高高频时的输入阻抗值，从而增高了高频时的增益，提高频带宽度。

必须指出，在多级放大器的级联电路中加入射极跟随器后可有效地提高整个放大器的增益频宽，这是因为射极跟随器有较高的输入阻抗和较小的输出阻抗，这样可以有效地隔离后一级负载电容（输入电容）对前一级的旁路作用。一个利用射极输出器作隔离级的实用放大器如图 8-5-12 所示，这个放大器是用二级四管组成的（图 8-5-12



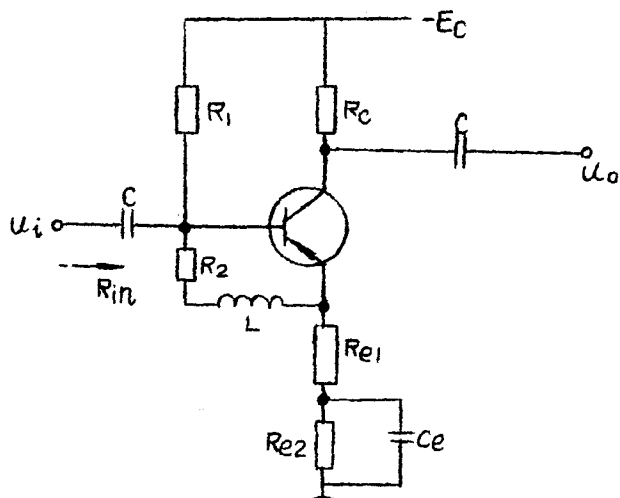


图 8-5-11

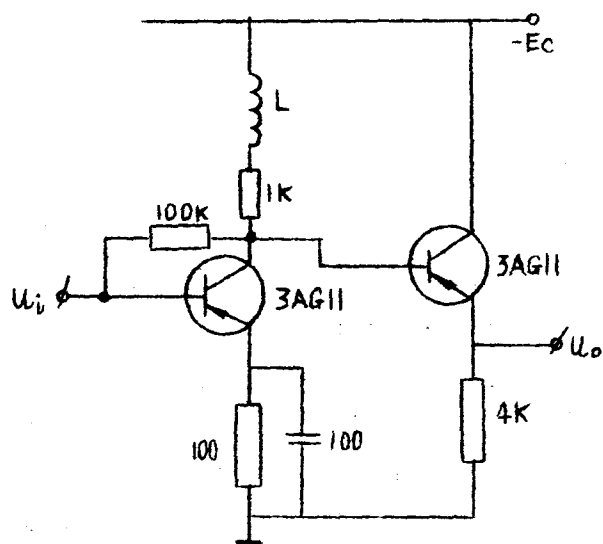


图 8-5-12